



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## MODERNÍ ANORGANICKÉ SLÉVÁRENSKÉ POJIVOVÉ SYSTÉMY

MODERN ANORGANIC FOUNDRY BINDER SYSTEMS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Lorenc

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Cupák, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Michal Lorenc**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Petr Cupák, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Moderní anorganické slévárenské pojivové systémy**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zpracování uceleného přehledu moderních anorganických slévárenských pojiv používaných pro výrobu forem a jader.

### **Cíle bakalářské práce:**

Výsledkem práce má být přehled různých skupin moderních anorganických slévárenských pojivových systémů s charakteristikami principů, na kterých tyto systémy pracují.

### **Seznam literatury:**

Jelínek, P. (1996): Slévárenské formovací směsi II. část - Pojivové soustavy formovacích směsí. Skripta VŠB TU Ostrava. Ostrava: VŠB-Technická universita Ostrava, 180. s. ISBN 80-7078-326-5.

Franěk, B., Humpola, J., aj. (1998): Vlastnosti směsí s novými pojivovými systémy na bázi alkalických křemičitanů a jejich regenerovatelnost. In: Sborník přednášek mezinárodní konference "Ekologická výroba odlitků do směsí s vodním sklem". Sand-Team Brno, s. 75-82.

Škuta, R., Jelínek, P., aj. (2003): Pojivové soustavy pro dehydratační pochody výroby jader na bázi alkalických silikátů. In: Sborník přednášek mezinárodní konference "Moderní metody výroby jader". Sand-Team Brno, s. 77-88. ISBN 80-02-01556-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku  
2015/16

V Brně, dne

L. S.

.....

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

.....

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Problémem dnešní doby způsobeným různými druhy činností je veliký dopad na životní prostředí. To platí i pro slévárenský průmysl, který má na tomto znečištění poměrně velký podíl. Z toho důvodu se neustále vyvíjejí nová pojiva, která nebudou mít takový dopad na životní prostředí. Cílem této práce je seznámit s těmito druhy pojiv, které jsou šetrnější k naší již tak dost zdevastované planetě.

### Klíčová slova

Formovací směsi, Anorganická pojiva, CORDIS<sup>®</sup>, DILAB<sup>®</sup>, INOTEC<sup>®</sup>, HYDROBOND, BEACHBOX<sup>®</sup>, GEOPOL<sup>®</sup>

## ABSTRACT

Today, the problem caused by various kinds of activities is a great impact on the environment. This also applies for the foundry industry, which has a relatively large share of this pollution. For this reason, constantly evolving new binders, which do not have such an impact on the environment. The aim of this work is to become familiar with these types of binders that are more friendly to our already devastated the planet.

### Key words

Moulding mixture, Anorganická pojiva, CORDIS, DILAB<sup>®</sup>, INOTEC<sup>®</sup>, HYDROBOND, BEACHBOX<sup>®</sup>, GEOPOL<sup>®</sup>

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LORENC, Michal. *Moderní anorganické slévárenské pojivové systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 32s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Cupák, Ph.D. .

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Moderní anorganické slévárenské pojivové systémy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Michal Lorenc

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Petru Cupákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky k vypracování této práce, a také za trpělivost, kterou se mnou musel mít.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ .....	7
OBSAH .....	8
ÚVOD.....	9
1 Formovací směsi .....	10
1.1 Ostřivo .....	10
1.2 Pojivo.....	11
1.2.1 Směsi I. generace .....	12
1.2.2 Směsi II. generace .....	12
1.2.3 Směsi III. generace .....	13
1.2.4 Směsi IV. generace.....	14
2 Anorganické pojivové systémy.....	14
2.1 Pojiva na bázi anorganických solí.....	14
2.1.1 Hydrobond.....	15
2.1.2 Beach Box® .....	15
2.2 Pojiva na bázi alkalických silikátů .....	16
2.2.1 INOTEC® .....	16
2.2.2 CORDIS® .....	18
2.2.3 GEOPOL® [13].....	20
2.2.4 Vodní sklo.....	22
2.2.5 DILAB® .....	25
3 Starší typy pojivových systémů.....	26
3.1 Bentonit .....	26
3.2 Tumerit [14] .....	27
3.3 Cementy [14].....	28
3.4 Sádra [14] .....	29
4 ZÁVĚR .....	30
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	31
SEZNAM OBRÁZKŮ: .....	32
SEZNAM TABULEK: .....	32



## ÚVOD

Historie a samotné slévárenství sahá více než 3000 let př. n. l., kdy už naši předkové využívali tohoto odvětví pro výrobu mnoha předmětů, potřebných ke každodennímu životu – jakož to nádoby, zbraně, ale také ozdobné předměty. Některé takto vyrobené předměty můžeme dodnes najít v muzeích. Od této doby se změnilo mnoho věcí, na které byl, je a bude kladen důraz. Mezi tyto věci řadíme hlavně kvalitu povrchu odlitku a především dopad na životní prostředí, které je již tak dost zdevastované. Proto se snažíme vyvíjet nové pojivové systémy na anorganické bázi, které jsou k životnímu prostředí šetrnější a tolik mu neškodí, avšak na úkor toho mají menší technologické vlastnosti (pevnost, rozpadavost, vstřelovatelnost, ...)

## 1 FORMOVACÍ SMĚSI

Patří mezi jednu z nejdůležitějších věcí potřebnou při odlévání součástí ve slévárenství. Hlavními částmi, které tvoří formovací směs, jsou ostřivo, pojivo a přísady (voda, tvrdidla, kamenouhelné moučka, atd., sloužící ke spojení ostřiva s pojivem). Tato směs dále slouží k výrobě netrvalých forem a jader. Vlivem vzájemného působení mezi ostřivem a pojivem vzniká pevnost formovací směsi. Obecně její pevnost dělíme na vaznost (pevnost v syrovém stavu), pevnost po vysušení, za zvýšených a vysokých teplot a nakonec zbytkovou.[1]

### 1.1 Ostřivo

Za ostřivo se považuje zrnitý materiál s velikostí částic nad 0,02 mm, menší částice se řadí do vyplavitelného podílu. Velikost středního zrna se pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,4 mm. Ostřivo má ve směsi největší objemový podíl a po zaformování tvoří skelet forem a jader. Jeho nejdůležitější vlastnosti jsou: aktivita povrchu zrn, hranatost a granulometrie zrn [2,3].

Rozdělení ostřiv dle chemické povahy [2,3]:

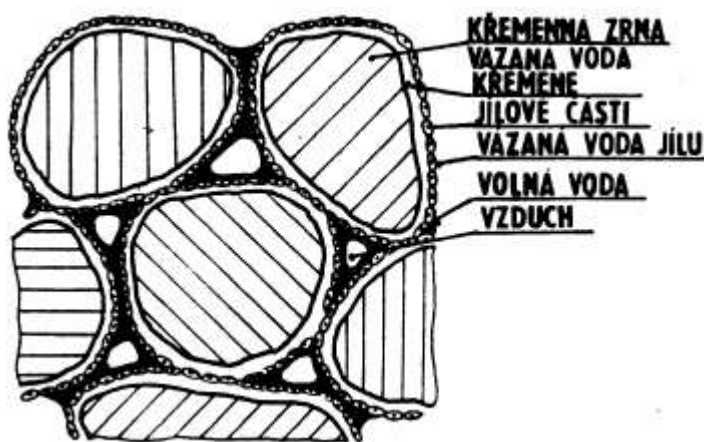
- Kyselé ostřiva (křemenné písky)
- Neutrální ostřiva (šamot, olivín, chromit, korund)
- Zásaditá ostřiva (magnezit)

Zásaditost ostřiva je důležitá při jeho volbě. Kyselé ostřiva totiž reagují se zásaditým oxidy legovaných ocelí za vzniku sloučenin s nižší žáruvzdorností, což způsobuje vznik povrchových vad (zapečenin) na odlitcích. Například křemenné ostřivo je nevhodné pro odlévání manganových ocelí. U tenkostěnných odlitků se forma opatřuje zásaditým či neutrálním nátěrem, u masivních odlitků je nutno použít směsi se zásaditým ostřivem. Při lití ocelí legovaných křemíkem naopak nelze používat zásaditých ostřiv [2,3].

Rozdělení ostřiv dle původu vzniku [2,3]:

- Přirozená ostřiva (křemenné písky, olivín, zirkon, dunit, ...)
- Umělá ostřiva (šamotová drť, chrommagnesit, korund, kovové kuličky, ...)

Volba druhu ostřiva závisí na mnoha faktorech, nejdůležitější jsou: chemická povaha a druh odlévané slitiny, tvarová složitost a tloušťka stěn odlitků, druh pojivového systému a v neposlední řadě cena směsi [2,3].



Obr. 1: Struktura formovací směsi [4]

## 1.2 Pojivo

Je to látka anorganického nebo organického původu, která v interakci s ostřivem poskytuje formě pevnost a další nezbytné technologické vlastnosti. Představuje 1-10% hmotnosti formovací směsi (podle druhu daného pojiva). V závislosti na typu použitých pojivových soustav se potom formovací směsi dělí do 4 generací. [1,4,5]

- Směsi I. generace (jílová pojiva) – vývojově nejstarší
- Směsi II. generace (chemicky tvrzené formovací směsi) – organické a anorganické.
- Směsi III. generace – prakticky bez pojiva, využívají fyzikální působení na ostřivo.
- Směsi IV. generace - využití biologických procesů

### 1.2.1 Směsi I. generace

Jedná se o nejstarší pojivovou soustavu využívající jílu – aluminosilikátů v přírodních nebo syntetických směsích. Formovací směsi s jílovými pojivy, kde pojení je výsledkem interakce voda – jíl (síly kapilárního tlaku a Van der Waalsovy síly) Tyto směsi se také nazývají jako vazné [4,5]

Jílovina je směs látek rozptýlených na částice menší než 0,002 mm. Jíl je pak zemina, která obsahuje nejméně 50 % jíloviny, zbytek je prach nebo písek s částicemi většími než 0,002 mm [4,5]

Ve slévárenství se pak využívají: [4,5]

- Kaolinitické jíly - spolu se šamotovým lupkem tvoří šamotovou formovací směs určenou pro výrobu forem a jader masivních ocelových odlitků
- Illitické jíly - jsou nejrozšířenější v přírodních pískách (zelené pojivo písku Rájec, hnědé pojivo písku Kobylisy). Nejdůležitějším minerálem této skupiny jílu je glaukonit
- Montmorillonitické jíly – jíly montmorillonitické jsou třívrstvé jílové materiály obsažené především v bentonitech (bentonit je jíl který má 75-80% montmorillonitu). Dodnes se jedná o jedno z nejpoužívanějších jílových pojiv, díky možnosti formování bez sušení „na syrovo“

### 1.2.2 Směsi II. generace

Oproti formovacím směsím I. generace vedly k zvýšení produktivity práce, snížení hlukové zátěže obsluhy a ke zlepšení povrchové kvality odlitků. Zpevnění jader a forem probíhá vytvrzováním chemickými reakcemi pojiva samovolně nebo zásahem zvenčí a to se s příchodem II. generace nazývá chemizace výroby.[5]

Pojiva v této generaci dělíme především na anorganická a organická

- Anorganické pojivové systémy – lze s nimi dosáhnout vysokých pevností, ale mají zhoršenou rozpadavost směsi po odlití, při těchto pojivech však nevzniká tolik závadných zplodin[1,4]

- Organické pojivové systémy – po termodestrukci dochází ke vzniku závadných zplodin a tudíž ke zhoršení pracovního prostředí, avšak jejich rozpadavost po odlití je vynikající[1,4]

Mezi nepoužívanější organické pojiva patří: [1,4]

- Fenolické pryskyřice
- Polyuretanové pryskyřice
- Furanové pryskyřice
- Alkydové, epoxidové, ...

### 1.2.3 Směsi III. generace

Přestože slévárenské formy a jádra vyrobené ze směsí II. generace přinesly do sléváren řadu vylepšení (vysoká pevnost, možnost výroby tvarově složitých jader, vysoká produktivita práce při využití automatické výroby, dlouhá skladovatelnost, atd.) je jejich použití spojeno s problémy znečišťování životního i pracovního prostředí. Jako reakce na tyto problémy byly vyvinuty pojivové systémy směsí III. generace, které k pojení ostřiva využívají fyzikální principy [1,4].

**Do této skupiny spadá: [1,4]**

- Pojení magnetickou silou – používá jednorázový (spalitelný) model, který má žáruvzdorný nátěr. Model je zasypán ocelovými broky, jež tvoří formu zpevněnou magnetickým polem. Lití se provádí přes vtokový systém přímo na model.
- Vakuové formování (V-metoda) – na model je položena ohřátá termoplastická folie, která je poté vakuem vytvořeným pod modelem přilnuta. Následně se kolem modelu ustaví rám, vysype suchým ostřivem a zhustí vibrací a zase překryje folií. Odsaje se opět vzduch z rámu a vakuum pod modelem se přemění v tlak vzduchu, který oddělí rám od modelu. Folie drží obě polo formy pohromadě, dokud nevyhoří odlitím, poté se forma sama rozpadá

- EFF – SET - za své pojivo používá led, který kromě pojivové plní i ochlazovací funkci, to má příznivý vliv na strukturu, mechanické vlastnosti a jakost povrchu odlitků

#### 1.2.4 Směsi IV. generace

Přestože směsi III. generace mají již několik výhod, tak pořád nesplňují představy o ideálním slévárenském pojivovém systému. Proto se neustále vyvíjí nové postupy, které využívají biologických postupů pro pojení formovacích směsí. Tyto pojivové systémy používají materiály, které jsou v porovnání s organickými pojivy výrazně šetrnější k životnímu prostředí. [1,4]

## 2 ANORGANICKÉ POJIVOVÉ SYSTÉMY

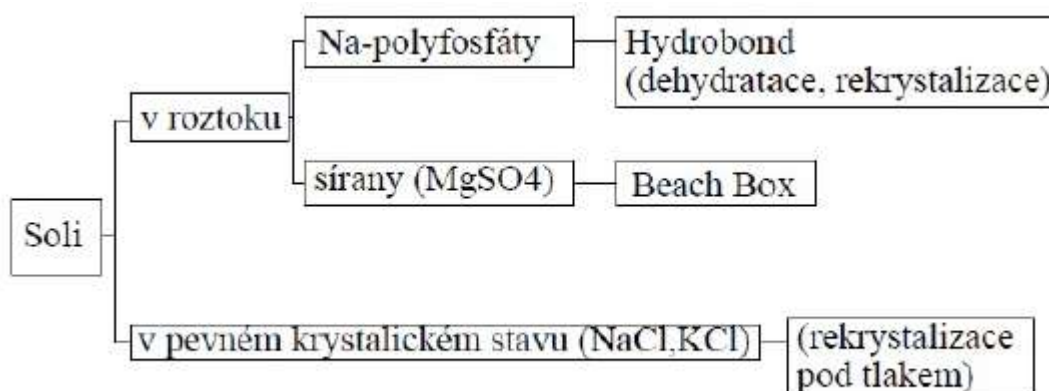
Jak již bylo několikrát v této práci zmíněno, že ekologický a ekonomický tlak neustále tlačí na vývoj nových pojivových systémů, které budou tento tlak snižovat. Jak ze strany ekologické díky menším emisím a snížení pevného odpadu vlivem regenerace formovacích směsí, tak i ze strany ekonomické díky menším nákladům na likvidaci těchto plynů a pevného odpadu vznikajícím při odlévání. Tím se zlepšují i podmínky na pracovišti a škodlivý vliv na pracovníky.

Dělí se do několika skupin, které jsou založeny na různých bázích a to **alkalické silikáty** (CORDIS<sup>®</sup>, DILAB<sup>®</sup>, INOTEC<sup>®</sup>, Vodní sklo), **anorganické soli** (HYDROBOND, BEACHBOX<sup>®</sup>), **geopolymery** (GEOPOL<sup>®</sup>) a další

### 2.1 Pojiva na bázi anorganických solí

Základem pojivového systému jsou soli rozpustné ve vodě. Používají se krystalické soli jako např. NaCl, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.xH<sub>2</sub>O, fosforečnany, MgSO<sub>4</sub>. Formovací směs je složena z křemenného písku, soli a aditiv. Po vstřelení do horkého jádru následuje vytvrzení, které probíhá při teplotě 100 až 300°C. Jádra lze vytvrzovat i mikrovlnným ohřevem. Hotová jádra se používají do forem pro tlakové lití (bentonitových, kokilových). Díky dobré rozpustnosti solí ve vodě probíhá odjádrování ponořením do vody. Dosahovaná pevnost jader je vyšší než u technologie Cold-Box. Negativem jsou delší výrobní časy, avšak plusem je, že

odlitky mají hladký povrch, při zhotovení směsí a lití nevznikají žádné škodlivé plyny. Jádra obsahující mírně navlhčenou sůl v pevném krystalickém stavu se vyrábí vysokotlakým lisováním. Zpevnění jader probíhá slinováním povrchově naleptaných zrn a rekrystalizací po hranici zrn. Jádra se používají do míst, kde je špatná přístupnost pro jejich odstranění [5,6].



Obr. 2 Přehled anorganických solí [6].

### 2.1.1 Hydrobond

Pojivem je roztok polyfosfátu sodného s aditivem. Obsah pojiva ve směsi je 1,5%. Jádra se vytvrzují teplým vzduchem o teplotě 80°C. Dobrá tekutost směsi umožňuje vstřelovat i tvarově komplikovaná jádra, která jdou pak lehce odstranit ponořením do vody. Ostřívo se po omytí a usušení může znovu používat. Voda se recirkuluje destilací s 85% využití pro další použití. Jádra se natírají pouze lihovými nátěry. Hydrobond se používá především pro jádra a formy odlitků z neželezných kovů [6].

### 2.1.2 Beach Box®

Pojivový systém BEACH BOX® je tvořen roztokem  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  anorganické přísady. Po smíchání všech částí se směs vstřeluje do horkého jaderníku, který je zahřátý na teplotu 130 až 140°C. Pro rychlejší vytvrzování je směs ještě profukována horkým vzduchem. Směs má vysokou tekutost a proto lze

vyrábět složitá tenkostěnná jádra menších hmotností. Po odlití lze jádra odstranit vibračním strojem či rozpouštěním ve vodě. Pojivo jako takové se při teplotách nad 200°C stane porézní a dobře se rozpadá. Jádra s pojivem BEACH BOX<sup>®</sup> nedosahují příliš vysokých pevností v ohybu. Je možné tuto pevnost zvýšit použitím kombinace BEACH BOX<sup>®</sup> s některými rozpustnými solemi (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). [6]

## 2.2 Pojiva na bázi alkalických silikátů

Tato pojiva se vlastnostmi blíží svými technologickými vlastnostmi pojivům organickým. Vytvrzování směsí s alkalickými silikáty probíhá dvěma způsoby, chemicky a fyzikálně. Chemicky za vzniku gelu kyseliny křemičité Si(OH)<sub>4</sub> a soli, která je vedlejším produktem reakce. Tento děj je na rozdíl od fyzikálního vytvrzování nevratný. Fyzikálním vytvrzováním vzniká dehydratovaný křemičitan Na<sub>2</sub>O·mSiO<sub>2</sub>. Výhodou fyzikálního vytvrzování jsou vysoké primární pevnosti, které umožňují snížit obsah pojiva a tím současně řeší rozpadavost směsi i regenerovatelnost ostřiva. Dehydratovaná směs není zdrojem vodní páry a plynů při lití, tím je omezen vznik exogenních bublin. Nevýhodou fyzikálního vytvrzování je klesající pevnost při skladování jader v prostorách s vyšší relativní vlhkostí vzduchu. Nanesením vodného nátěru se snižuje povrchová pevnost jader. Směsi nemají tak dobrou vstřelovatelnost jako směsi organické [6].

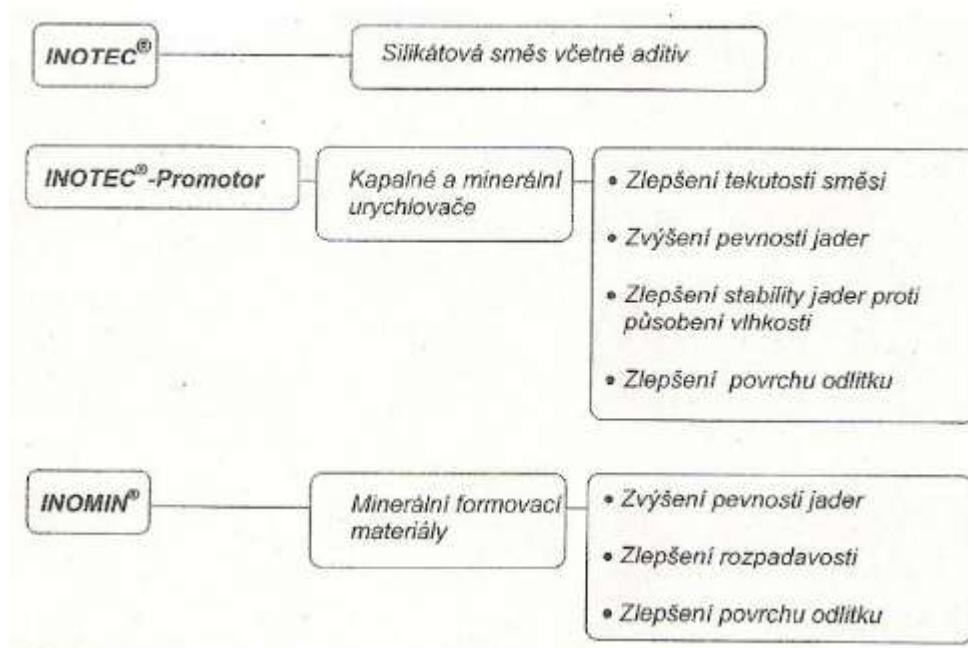
### 2.2.1 INOTEC<sup>®</sup>

Jedná se o nové pojivo z roku 2009 na bázi vodního skla vyvinuté společností ASK Chemicals ve spolupráci se slévárnou BMW. Množství pojiva ve směsi se pohybuje v rozmezí 1,8-2,5 %. Jádra se vytvrzují dehydratací ve vyhřívaných jadernících o teplotě 150-200 °C v kombinaci s profukováním horkým vzduchem. Vytvrzovací reakce je však vratná, a proto mají jádra při zvýšené vlhkosti vzduchu sklon k rehydrataci. Pro prodloužení skladovatelnosti jader v běžných klimatických podmínkách bez rizika zpětného navlhnutí jsou do směsi přidávána speciální aditiva (tzv. promotory 0,1 – 1%), které výrazně zvyšují chemickou stabilitu jader a zároveň urychlují proces pojení. Díky anorganické povaze se pojivo vyznačuje nízkou tvorbou emisí a šetrností k životnímu prostředí. V důsledku snížení množství kondenzátů je také omezena tvorba usazenin. Jako



další výhody uvádí výrobce snížení zmetkovitosti a zlepšení rozpadavosti směsi. Jako optimální ostřivo je používán INOMIN (1 – 30% z hmotnosti křemenného ostřiva) [5, 7, 8].

Pojivo INOTEC® se primárně používá pro výrobu odlitků ze slitin lehkých, neželezných kovů. Jeho aplikace se osvědčila především při výrobě tvarově složitých odlitků pro automobilový průmysl (např. bloky motorů, hlavy válců, části podvozků...). V současné době je vývoj tohoto pojiva zaměřen na výrobu železných odlitků, zejména litiny. I v této oblasti je dosahováno velmi dobrých výsledků [7, 8].



Obr. 3: INOTEC® - tříložkový systém sestávající z pojiva, promotoru a volitelné komponenty INOMIN® [9]

Pojivo Inotec® způsobuje také lepší kvalitu povrchu odlitků a vzniká méně usazenin než u organických pojiv, takže jsou menší náklady i na čištění nástrojů. V Tab. 1 je srovnání technologie Inotec® s technologií Cold-Box. Kromě výhody použití horkého vzduchu na profukování pro Inotec® oproti Cold-Box, kde se používají aminy, je potřeba jaderník čistit méně často než u metody Cold-Box. Ve

výsledku tedy systémem Inotec® lze oproti organickému pojivu snížit emise o 98% a snížit zmetkovitost odlitků o 7%. [8]

	<b>Cold box</b>	<b>Inotec</b>
pojivo	0,56 % Ecocure 1. část 0,56 % Ecocure 2. část	2,0 % pojivo 0,8 %* promotor
celková doba cyklu	62 s	62 s
teplota jaderníku	25 °C	180 °C
teplota profukování /nosič	70 °C amin	180 °C horký vzduch
cyklus čištění jaderníku	1 500 vstřelení	2 500 vstřelení

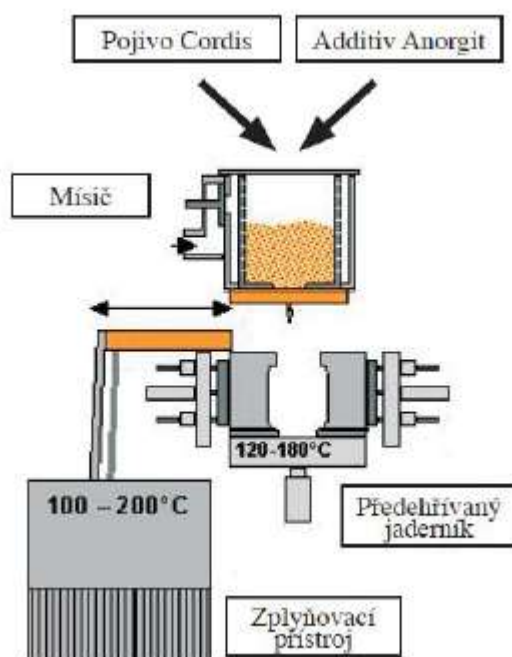
Tab. 1: Srovnání výroby systémem Cold-Box a Inotec® [8]

### 2.2.2 CORDIS®

Již začátkem 90. let vznikla myšlenka vytvořit pojivový systém s vodou jako jediným rozpouštědlem a realizovat jednu úplnou anorganickou pojivovou matici. Tuto myšlenku se podařilo zrealizovat až v letech 2000/2001, kdy bylo vytvořeno vodou rozpustné pojivo CORDIS firmou Hüttenes-Albertus a následně v roce 2003 na výstavě GIFA tato firma představila CORDIS®. [10, 11]

Jedná se o čistě anorganický, dvousložkový pojivový systém skládající se z pojiva Cordis a aditiva Anorgit. Je to modifikovaný silikátový roztok, jehož rozpouštědlem je právě voda. Použitím tohoto pojivového systému, lze dosáhnout kvalit odlitků, jako při použití dnes dostupných pojiv organických. Navíc CORDIS® nabízí velké snížení emisí a zvýšení produktivity slévárny. Použití anorganického pojiva CORDIS® navíc přináší, kromě ekologických výhod i výhody ekonomické. Odpadá čištění odtahovaného vzduchu v jaderně a slévárně, dochází k menšímu otěru kokil, minimálně srovnatelná kvalita odlitků jako u pojiv organických (někdy i vyšší), možnost regenerace. Nevýhodou této metody je ohřev jaderníků a chlazení vstřelovací hlavy. [12]

Pojivo je tvořeno směsí fosfátových, silikátových a boratových skupin, jejichž kombinací nastavujeme požadované vlastnosti jednotlivých pojivových typů systému CORDIS®. Pro zlepšení těchto vlastností je možné přidat další anorganické přísady. Ty mohou být součástí pojiva, nebo se dávkuje do jádrové směsi během míchání jako aditiva. Kombinací těchto aditiv dochází k cílenému ovlivňování tekutosti, skladovatelnosti, rozpadavosti a dalších vlastností. [10]



Obr. 4: výroba jádra s pojiva CORDIS®.[10]

Kvalitně namíchaná formovací směs je vstřelována do předehřátého jaderníku na 120-180°C. V první fázi po vstřelení dochází k sušení směsi neboli odstranění vody, která je rozpouštědlem. Dále probíhá chemické vytvrzování dle typu pojivového systému CORDIS®. Chemické vytvrzení dodá jádru větší pevnost než samotné vysušení. Množství pojiva ve směsi se pohybuje mezi 1,5 až 3% hmotnosti směsi. Pevnosti v ohybu za studena se pohybují mezi 3,5 až 5,5MPa. Vytvrzování je možno velice urychlit vstřelováním ohřátým vzduchem. Z toho důvodu je vhodné, aby jaderníky byly opatřeny vhodnými dutinami pro ohřátý vzduch a jaderník, musí odolávat teplotám kolem 200°C, protože vháněný vzduch musí být o něco teplejší, aby při průchodem směsí udržel teplotu 150°C. Vytvrzovací čas se pohybuje kolem 25-40 sekund. Díky dobré tekutosti směsi s pojivem CORDIS®, lze vyrábět tvarově složitá jádra (jádra vodního pláště, jádra

sacích vedení sestavy pro hlavy válců). Při odlévání z hliníkových slitin lze použít jader bez nátěrů, pro jiné slitiny (např. litiny), lze použít lihových či vodných nátěrů. Je však třeba počítat se ztrátami na pevnosti, obzvlášť u vodných nátěrů. Vzhledem k hydrofilitě jader, nesmíme jádra vystavovat při uskladnění vyšším vlhkostem. Při zkoušení navlhavosti zkušebního trámečku byl po 24 hodinách v prostředí s vyšší vlhkostí zaznamenán pokles pevnosti o jednu třetinu. [10]

### 2.2.3 GEOPOL<sup>®</sup> [13]

Tento pojivový systém vyvinula česká firma SAND TEAM CZ, a je dále komerčně rozšiřovaný společnostmi SAND TEAM CZ, John Winter Ltd UK a Technofond GmbH Německo. Byl vyvinut v reakci na rostoucí potřeby slévárenství vyžadující proces, který řeší problematiku par, zápachu a nakládání s odpady. Předchůdcem GEOPOL<sup>®</sup> byl pojivový systém RUDAL A vyvinutý taky firmou SAND TEAM CZ.

Technologie GEOPOL<sup>®</sup> je ekologický anorganický pojivový systém na bázi geopolymérů, určený k výrobě forem a jader ze směsí pro výrobu odlitků ze slitin železných i neželezných kovů.

Jako pojivo je využíván anorganický geopolymerní prekurzor s nízkým stupněm polymerizace. Vytvrzuje se buď tekutými tvrdidly řady SA nebo působením CO<sub>2</sub>. Tak vznikne anorganický polymer, jehož charakteristiky umožňují adhezivní destrukci obálek zrn, zajišťují vynikající rozpadavost forem a jader za nízkých teplot a umožňují účinnou regeneraci vratného písku.

Ke směsi pro vytvrzování účinkem CO<sub>2</sub> se přidávají akcelerátory s označením GEOTEK pro dosažení vyšších okamžitých pevností a také zaručující dlouhodobou skladovatelnost jader. Firmou SAND TEAM speciálně vyvinutá tvrdidla řady "SA" umožňují použití vysokého procenta regenerovaného písku při přípravě samotvrdnoucích směsí.

Díky speciální řadě tvrdidel GEOPOL<sup>®</sup> mohou být geopolymerní pojiva použita k přípravě samotvrdnoucích směsí s využitím vysokého procenta regenerovaného písku.



Obr. 5: Příklad odlitku při použití GEOPOL® [13]

Výhody ve srovnání s vodním sklem:

- Dodává směsím vyšší pevnosti, což umožňuje použít nižší dávkování.  
Běžně mezi 1,8 až 2,5 % podle předpokládané aplikace.
  - Zlepšená tekutost se projevuje ve vyšší hustotě formy = lepší povrch odlitku.
  - Zlepšení vytloukání.
  - Nižší potenciál vodíku – legované oceli.
  - Méně dýmu při formování, odlévání a vytloukání.
- Používá se dávkování tvrdidla mezi 10 až 18 %.
  - Je možné upravovat časy rozebírání a životnosti pro dané tvrdidlo.
- Vratné písky ze směsí s pojivem GEOPOL® mohou být mechanicky regenerovány a znovu použity pro výrobu forem a jader až do přísady:
  - Až do 50 % při jednoduché jednostupňové otírce.
  - Při dvoustupňové nebo intenzivní otírce až do 90 %.

Směsi s tímto pojivem pro výrobu forem a jader je možné připravit buď v dávkovém nebo v průběžném mísiči. Je možné je použít k výrobě odlitků z oceli,

litin i slitin neželezných kovů. Pojivo GEOPOL<sup>®</sup> lze aplikovat pro všechny druhy písků – všechny křemenné písky, písky olivínové, chromitové, zirkonové a další.

Vývoj GEOPOL<sup>®</sup> sebou přináší podstatné zlepšení stavu hygienických a ekologických parametrů výroby ve slévárně v porovnání s ostatními technologiemi, a proto pomáhá řešit zdravotní a ekologické problémy ve slévárnách.

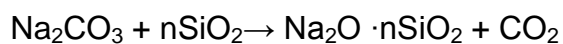


Obr. 6: Formy a jádra při použití GEOPOL<sup>®</sup> [13]

#### 2.2.4 Vodní sklo

Vodní sklo bylo vyvinuto roku 1818 J. N. Fuchsem a jako pojivo je ve slévárenství využíváno přes již mnoho let. [14]

Výroba pevného vodního skla probíhá v kontinuální vakuové peci při 1300÷1400°C, kde se taví sklářský písek o vysoké chemické čistotě ( $\text{SiO}_2 > 98,5\%$ ) s kalcinovanou sodou ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Vzniklá tavenina se po vychlazení granuluje. Chemický proces probíhá dle chemické reakce: [14]



Taveninu vodního skla lze také připravit chemickou reakcí síranu dvojsodného, sklářského písku a uhlíku (koku). [14]



Produkt chemických reakcí označujeme také jako sodnokřemičitou sklovinu ( $n\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O}$ ). Měrná hmotnost skloviny je  $2410 \text{ kg/m}^3$ . Molární poměr  $m$  mezi  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Na}_2\text{O}$  se nazývá tzv. modul vodního skla. Nejvíce vyráběná vodní skla mají molární poměr sodnokřemičité skloviny tzv. modul okolo 3,2 - 3,5. Rozpouštění pevné granulované skloviny ve vodě probíhá v ocelových rotačních autoklávech za vzniku vodného roztoku vodního skla: [5, 14]

hydratace:  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + m\text{H}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} + (m-x)\text{H}_2\text{O} - \Delta H$   
( $-\Delta H$  je teplo uvolněné při hydrataci)

hydrolýza:  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 + y\text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + n\text{SiO}_2 + (y-1)\text{H}_2\text{O}$

Dalším postupem jak přímo vyrobit vodní sklo je hydrotermální metoda. Křemenný písek se rozpouští ve vysoce alkalickém roztoku NaOH v legovaných vertikálních autoklávech při tlaku vodní páry  $1\div 2 \text{ Mpa}$  [14].

Základní rozdělení vytvrzování vodního skla: [14]

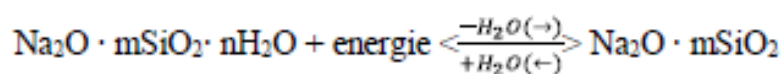
1. CHEMICKÉ VYTVRZOVÁNÍ: -  $\text{CO}_2$  proces
  - vytvrzování kapalnými tvrdidly
  - (- vytvrzování pevnými tvrdidly)
2. FYZIKÁLNÍ VYTVRZOVÁNÍ: dehydratace: - metoda HOT BOX
  - profukování horkým vzduchem
  - mikrovlnný ohřev

Chemické vytvrzování vodních skel působením  $\text{CO}_2$ , kyselin nebo esterů dochází k chemickému vytvrzování vodního skla (je to ireverzibilní proces) za vzniku gelu a vedlejších produktů ve formě krystalických solí. Důsledkem vzniku



těchto vedlejších produktů v gelu jsou krystalické útvary, které narušují souvislost pojivového povlaku na zrnech ostřiva. Takto vzniklý gel má vysoké vnitřní napětí, které způsobuje křehkost. [14]

Vytvrzování směsi s vodním sklem dehydratací je reverzibilní proces (můžeme opět použít) a taky je tento proces dokonale vratný. To ale přináší nevýhodu pro dlouhodobé skladování, z důvodu navlhání jader. Pro snížení navlhavosti lze použít speciální aditiva. Vytvrzování probíhá podle následující rovnice: [5, 14]

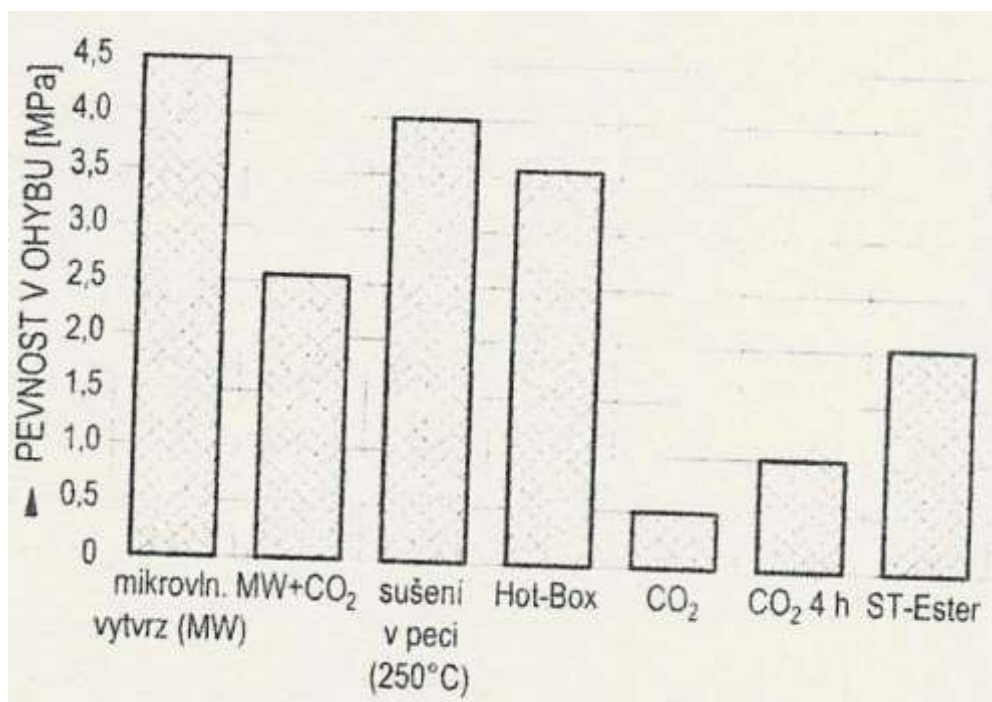


kde  $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  je vodní sklo a  $\text{Na}_2\text{O} \cdot m\text{SiO}_2$  je křemičitan sodný.

Vytvrzování realizujeme profukováním horkého vzduchu, metodou Hot-Box, nebo mikrovlnným ohřevem. Vytvrzované směsi dehydratací mají přibližně o řád vyšší pevnost než u chemického vytvrzování ( $\text{CO}_2$  – proces, ST směsi s estery). Jak je vidět z obrázku č. 7 nejvyšší pevnosti v ohybu dosahují jádra mikrovlnným vytvrzováním. U této metody se jádra vytvrzují rovnoměrně v celém objemu. Jaderníky mohou být vyrobeny z teflonu, nelepeného dřeva, skla či speciálního betonu. U metody Hot-Box se jádra vytvrdí prostupem tepla od horkého kovového jaderníku, a proto je průběh vytvrzování pomalejší. Teplota kovového jaderníku se pohybuje kolem  $210^\circ\text{C}$ . Vytvrzování metodou Hot-Box trvá 60÷70 sekund.

Jádra z dutin odlitku lze odstranit ponořením do vody. Mokrý regenerace ostřiva je oproti mechanickému způsobu náročnější, neboť ostřivo se musí následně sušit a kontaminovaná voda čistit. Samotný rozpad jader ve vodě nastane do 60 minut od ponoření do vody. Výrazně rychlejší rozpad nastane ponořením jádra do vody za tepla (např. spolu s odlitkem), kdy k samovolnému rozpadu dojde do 2 minut. Tohoto způsobu je vhodné použít u špatně dostupných děr odlitků [5].





Obr. 7 Porovnání pevností v ohybu jader při různém postupu vytvrzování [14].

Nedostatky vodního skla jako pojiva: [14]

- nízká pevnost po vytvrzení
- vysoká sekundární pevnost (špatná rozpadavost)
- obtížná regenerovatelnost

Rozpadavost se zlepšuje snížením koncentrace  $\text{Na}_2\text{O}$  ve směsi (m), snižováním obsahu vodního skla ve směsi, přísadami organického i anorganického původu a nyní i strukturními změnami anorganického polymeru.

Vodní sklo se modifikuje fyzikální nebo chemickou cestou zvyšováním stupně polykondenzace silikátových aniontů. Další možnost modifikace spočívá ve změně procesu výroby silikátu, změnou silikátu, změnou teplot a tlaků rozpouštění. [14]

### 2.2.5 DILAB®

DILAB® je anorganické pojivo na bázi Na-silikátu, které má velice dobrou rozpadavost po odlití, při teplotách 600-1000°C. Díky vhodně zvoleným tvrdidlům má tento pojivový systém i dobrou regenerovatelnost. Při vytvrzování technologií

Hot-Box či mikrovlnným vytvrzováním, lze pohodlně směs po odlití vyplavit ve vodě. [15]

Pojivo DILAB<sup>®</sup> je možno použít v kombinaci s křemennými i nekřemennými ostřivy. Nejvhodnější jsou však ostřiva bazické povahy. [12]

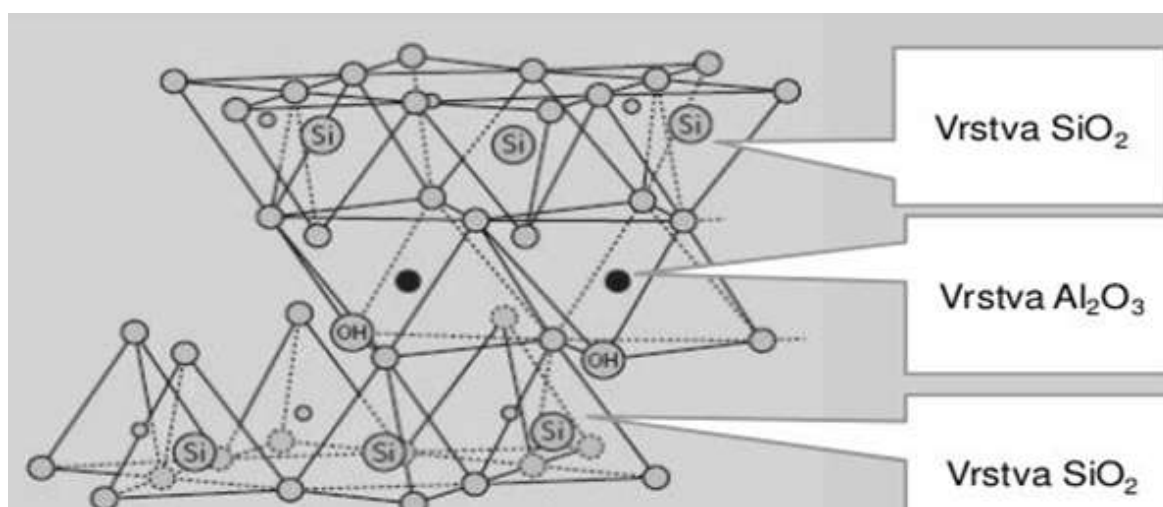
Pojivový systém DILAB<sup>®</sup> má zvýšené primární pevnosti a to díky tomu, že polymerní řetězec alkalického silikátu je částečně nahrazován (substituován) tetraedry typu  $[\text{MeO}_4]^{4-}$ . Díky tomu lze snížit koncentraci pojiva. Další pozitivní následky jsou zvýšení primárních pevností, snížení sekundární pevnosti a zlepšení rozpadavosti. Pojivo je šedo-modré, transparentní a je stabilní při normálních podmínkách uskladnění alespoň 3 měsíce. [12]

Vytvrzování pojivového systému lze provést  $\text{CO}_2$  procesem, samovytrdnutím pomocí esterů nebo pro nás nejzajímavějším způsobem fyzikální konverze sol-gel. Při použití metod Hot-Box či Warm-Box získáváme vysoké pevnosti při minimálním obsahu pojiva ve srovnání s chemickými metodami. Kromě metody Hot-Box je možnost i mikrovlnného vytvrzování zařízením s dostatečným výkonem. [12]

### 3 STARŠÍ TYPY POJIVOVÝCH SYSTÉMŮ

#### 3.1 Bentonit

Jedná se o pojivo na bázi jílu obsahující minimálně 75% montmorillonitu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Bentonit vzniká zvětráváním mateční horniny z čediče (třetihorní hornina). Je charakteristická vysokým obsahem jílových nerostů. Má velmi dobrou sorpční vlastnost, vysokou schopnost výměny kationtů. Je to plastická hornina s vlastnostmi, které jí umožňují bobtnat. Chemické i minerální složení horniny je velmi proměnlivé a závislé na vzniku ložiska. Nejvýznamnější částí horniny je montmorillonit. Bentonit obsahuje kromě montmorillonitu i další příměsi jako kaolinit, illit, beidellit. Montmorillonit má vrstevnatou, lístkovou strukturu. Mezi dvěma vrstvami tvořenými tetraedry  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  (tzv. siliková vrstva) je vrstva oktaedru  $(\text{AlO}_6)^-$ , (tzv. gibbsitová vrstva). [16]



Obr. 8 Struktura Montmorillonitu [16].

**Existují 2 typy bentonitů: [16]**

Silně bobtnavé – sodné bentonity (wyomingský typ), pouze ložiska v USA.

Méně bobtnavé – obsahující převážně vápník, hořčík a draslík. Obohacují se průmyslově sodíkem a tím dochází k aktivaci bobtnací schopnosti. Bohužel i po této úpravě nedosahují kvality silně bobtnavých bentonitů.

**3.2 Tumerit [14]**

Tumet je žáruvzdorný illitický jíl pro šamotové formovací směsi. Jeho výroba skončila někdy v roce 2005. Dávkoval se do směsi v množství 10 – 15 %, vlhkost směsi byla 7 – 9 %, vaznost směsi za syrova byla do 1 MPa.

Směs se musela sušit při teplotě 500 – 600 °C po dobu min 4 hod, velké formy i 12 – 16 hod. Pevnost po sušení byla 2 – 5 MPa, povrch takto zhotovených firem a jader se ošetřoval námazkem (hustý korundový nebo zirkonový vodní nátěr) za tepla.

Tato technologie se používala pro výrobu forem pro zejména pro ocelové odlitky těžší než 1 tuna. Bylo dosahováno kvalitních povrchů odlitků, ale metoda byla málo produktivní a především velice energeticky náročná. Množství tepla potřebné pro vysušení forem bylo větší než množství tepla potřebného pro roztavení odlévaného kovu.

### 3.3 Cementy [14]

V evropských zemích byly cementové směsi rozšířeny zejména ve Francii a Německu, kde se vyrábí více druhů speciálních cementů, avšak rozšířením furanových směsí se od jejich používání upustilo. Ani v České republice není v současné době systém výroby forem a jader z cementových směsí rozšířen. Důvodem jsou mnohé nevýhody, především dlouhá doba vytvrzování.

Cement je práškové anorganické pojivo, vyráběné pálením minerálních surovin, které po rozmíchání s vodou tuhne a tvrdne. Řadí se do skupiny hydraulických maltovin, které po počátečním zatuhnutí na vzduchu tuhnou a tvrdnou na vzduchu i pod vodou.

Základními surovinami pro výrobu cementu jsou většinou vápence a silně vápenaté jíly (obsahující uhličitán vápenatý a hydraulické činitele).

**Cementová pojiva vycházejí ze tří základních druhů cementů:**

- ***Portlandský cement***
- ***Struskoportlandský cement***
- ***Hlinitanový cement***

#### ***Přednosti cementových směsí***

- nevyžadují sušení
- nižší energie pěstování ve srovnání s jílovými pojivy
- nízká cena
- není potřeba používání složitých kovových výztuh
- malý sklon k vadám z napětí u rozsáhlých ploch
- dobré pracovní podmínky a bezproblémové deponování odpadních písků.

***Nedostatky cementových směsí***

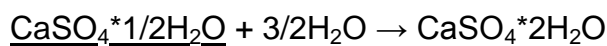
- obtížné vyjímání modelů po dlouhodobém cyklu vytvrzování formy
- dlouhá doba vytvrzování
- špatná rozpadavost
- vysoké náklady při vybíjení a čištění

**3.4 Sádra [14]**

Sádra je hydraulicky tuhnoucí maltovina vyrobená odvodněním sádrovce:



Po smíchání s vodou dochází k opětovné hydrataci – sádra ztuhne a změní se v pevnou hmotu



Toto pojivo se používá na výrobu forem složitých modelů díky své velmi dobré tekutosti a tím zaručuje přesné vytvoření formy. Do takovýchto forem se odlévají slitiny Al a Cu. Odlitky mají výborný povrch a přesnost 0,2 mm na 300 mm.

Doba tuhnutí sádry závisí na:

- druhu sádry
- množství vody (voda ↓ ↑ rychlost tuhnutí)
- teplotě vody (teplota ↑ ↑ doba tuhnutí)

Zpomalovače tuhnutí: borax, křihová voda, vápenné mléko, soli kyseliny jablečné, citronové, octové...

Urychlovače tuhnutí: soli kyselin, které dávají se sírany nerozpustné sraženiny (NaO, MgC<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>Cl).

## 4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat přehled moderních anorganických slévárenských pojiv a ukázat rozdíly mezi jejich chemickým složením, postupem vytvrzování, vlastnostmi, které dané pojiva mají po vytvrzení a schopnostmi regenerace. Příčinou vzniku a pokračujícího vývoje těchto pojivových systémů je v dnešní době zejména snaha výrobců co nejvíce omezit množství škodlivých látek vznikajících v jednotlivých fázích výroby odlitků. Avšak zároveň je nezbytné, aby nová pojivové systémy byly také ekonomicky přijatelné a aby vyrobená jádra měla dobré technologické vlastnosti zaručující vysokou kvalitu odlitku a plynulost výrobního procesu. Mezi výsledky tohoto vývoje patří především pojiva INOTEC<sup>®</sup>, CORDIS<sup>®</sup> a GEOPOL<sup>®</sup>, která již splňují vysoké ekologické a ekonomické nároky a zároveň splňují i požadované technologické vlastnosti, zejména pevnost.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] JELÍNEK, Petr. *Slévárenství*. 5. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007, 255 s. ISBN 978-80-248-1282-3.
- [2] JELÍNEK, Petr. *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí. Ostřiva*. Ostrava: vlastním nákladem, 2000, 138 s. ISBN 80-238-6118-2.
- [3] HORÁČEK, Milan. *Teorie slévání*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1991, 132 s. ISBN 80-214-0293-8.
- [4] HORÁČEK, Milan. *Teorie Slévání*. 2. vydání. Vysoké učení technické v Brně, 1991. ISBN 80-214-0293-8.
- [5] JELÍNEK, Petr. *Pojivové soustavy slévárenských formovacích směsí: (chemie slévárenských pojiv)*. Ostrava: P. Jelínek, 2004, 241 s. ISBN 80-239-2188-6.
- [6] JELÍNEK, Petr. Anorganická pojiva si razí cestu do sléváren. *Slévárenství*. 2012, 66 - 70, s. 18 - 22. ISSN 00 37 – 6825
- [7] *INOTEC® Binder System* [online]. ASK Chemicals GmbH, Hilden [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.ask-chemicals.com/EN/foundry-products/products/inotec-binder-system.html>.
- [8] MÜLLER, Jens; KOCH, Diether; FROHN, Marcus; WEICKER, Günter; KÖRSCHGEN, Jörg; SCHRECKENBERG, Stefan. INOTEC® se osvědčuje v praxi. *Slévárenství*, 2009, č. 1-2, s. 18-22. ISSN 0037-6825.
- [9] MÜLLER, Jens; STÖTZEL, Reindhard; TEGEL, Michal; VONDRÁČEK, Radek. Inovativní řešení pro slévárny využívající anorganické principy. *Slévárenství*. 2009, 1 - 2, s. 120 - 122. ISSN 0037 - 6825
- [10] LÖCHTE, Klaus; BOEHM, Ralf; LUBOJACKÝ, Miroslav; IVANOV, Štefan. CORDIS - anorganický pojivový systém. *Slévárenství*, 2009, č. 1-2, s. 36-39. ISSN 0037-6825.
- [11] Cordis [online]. HA International LLT, V1.0, Vydáno 12.2.2009 [cit. 2016-04-6]. Dostupné z WWW: <[http://www.ha-international.com/pdf/CordisPresentati on.pdf](http://www.ha-international.com/pdf/CordisPresentati%20on.pdf)>
- [12] *Formovací materiály: Formstoffe = Moulding Materials : mezinárodní konference, 12. ročník : 19. a 20.4.2011, Hotel Devět Skal, Českomoravská vrchovina, Milovy*. 1. vyd. Brno, 2011, 232 s. ISBN 978-80-02-02316-6.
- [13] *GEOPOL®* [online]. Brno, ©2015 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.geopol-info.com/cs/>
- [14] CUPÁK, Petr. *Anorganická slévárenská pojiva*. Brno, s. 49., poskytnuté podkladové materiály

- [15] *Vodní skla a pojivové systémy* [online]. Vodní sklo a.s., [cit. 2016-05-08]. Dostupné z WWW: <http://www.vodnisklo.cz/view.php?cisloaktuality=2009082501mn=13>
- [16] CUPÁK, Petr. *Bentonitové formovací směsi*. Brno, s. 69., poskytnuté podkladové materiály

### SEZNAM OBRÁZKŮ:

- Obr. 1: Struktura formovací směsi [4]  
Obr. 2 Přehled anorganických solí [6]  
Obr. 3: INOTEC<sup>®</sup> - tříložkový systém sestávající z pojiva, promotoru a volitelné komponenty INOMIN<sup>®</sup> [9]  
Obr. 4: výroba jádra s pojiva CORDIS<sup>®</sup>. [10]  
Obr. 5: Příklad odlitku při použití GEOPOL<sup>®</sup> [13]  
Obr. 6: Formy a jádra při použití GEOPOL<sup>®</sup> [13]  
Obr. 7 Porovnání pevností v ohybu jader při různém postupu vytvrzování [14].  
Obr. 8 Struktura Montmorillonitu [16].

### SEZNAM TABULEK:

- Tab. 1: Srovnání výroby systémem Cold-Box a Inotec<sup>®</sup> [8]



